**International Science Journal of Engineering & Agriculture**
2022; 1(4): 80-91
https://isg-journal.com/isjea/
doi: 10.46299/j.isjea.20220104.04
ISSN: 2720-6319

# Вимірювання імпедансу біологічних тканин та інших середовищ за допомогою оціночної плати EVAL AD5933EBZ

**Віктор Нікітін**
кафедра біомедичної кібернетики, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID 0000-0003-1640-8986

**Андрій Дубко**
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України; кафедра біомедичної інженерії, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID 0000-0001-6070-3945

**Для цитування цієї статті:**
Нікітін Віктор, Дубко Андрій. Вимірювання імпедансу біологічних тканин та інших середовищ за допомогою оціночної плати EVAL-AD5933EBZ. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 1, No. 4, 2022, pp. 80-91. doi: 10.46299/j.isjea.20220104.04.
**Надійшла до редакції:** 18 серпня 2022 р.; **Схвалено:** 25 серпня 2022 р.;
**Опубліковано:** 01 жовтня 2022 р.

**Анотація:** Аналіз та вимірювання електрофізичних властивостей біологічних матеріалів, рідин і суспензій є важливою прикладною задачею практично для всіх галузей медицини, хімії, фармації, фізики й інших галузей, що потребують досліджень властивостей і структури речовини. Сучасна електронна компонентна база дозволяє створювати мініатюрні прилади й вимірювальні системи для аналізу електричних кіл, такою є спеціалізована інтегральна мікросхема AD5933. Ця мікросхема є інтегральним перетворювачем спектрального складу імпедансу в широкому діапазоні частот. У мікросхемі AD5933 застосовується метод цифрової обробки сигналів, як для генерації тестової гармонійної напруги, так і аналізу струму двополюсника. Вона є базою оціночної плати EVAL-AD5933EBZ, яка дозволяє впроваджувати методи імпедансної спектроскопії у медицину, промисловість та сільське господарство.

**Ключові слова:** імпедансна спектроскопія, інтегральна мікросхема AD5933, оціночна плата EVAL-AD5933EBZ**,** діапазон частот, мікроконтролер, програмне забезпечення, графічний інтерфейс користувача, калібрування**,** біологічні тканини**.**

## 1. Вступ

Розвиток сенсорних пристроїв, і зокрема, мікросхемотехніки їх вимірювальних перетворювачів обумовлює подальший розвиток інфокомунікаційних систем — Інтернет Речей (IoT, Internet of Things) [1]. Високою універсальністю характеризуються сенсорні пристрої, в основі роботи яких покладені методи вимірювання імпедансу. Такі пристрої використовують, зокрема, для дослідження параметрів твердих та рідких матеріалів з іонною, ковалентною чи змішаною провідністю, а також, діелектриків.

Аналіз та вимірювання електрофізичних властивостей біологічних матеріалів, рідин і суспензій є важливою прикладною задачею практично для всіх галузей медицини, хімії,

фармації, фізики й інших галузей, що потребують досліджень властивостей і структури речовини.

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Об’єктом дослідження є мікроелектронні перетворювачі імпедансу. Предметом досліджень є методи вимірювання імпедансу; структурні елементи та електрофізичні параметри мікроелектронних перетворювачів імпедансу.

## 3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є вибір мікроелектронного перетворювача імпедансу для подальшої розробки сенсорного пристрою діагностики стану біологічних тканин та інших середовищ.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити та дослідити: концепцію побудови мікроелектронних перетворювачів імпедансу; вибрати спеціалізовану інтегральну мікросхему для аналізу електричних кіл та забезпечити її управління; провести калібрування вимірювальної системи; провести вимірювання невідомого імпедансу; зберегти дані вимірювань.

## 4. Аналіз літератури

Впровадження методів та засобів вимірювання в медичну галузь забезпечує оперативність та об’єктивність оцінювання широкого спектру морфологічних і фізіологічних параметрів організму, експрес-діагностики функціонування організму людини та виявлення патологій. Одним із таких методів є імпедансна спектроскопія [2, 3]. У порівнянні з іншими методами фізичних досліджень імпедансна спектроскопія та сенсорні IoT пристрої на її основі забезпечують простоту реалізації, високу енергоефективність, хорошу роздільну здатність та селективність вимірювань параметрів досліджуваних об’єктів [4, 5, 6]. Цей метод набув сьогодні широкої популярності у медицині, адже має практичне різноманітне застосування. Об’єктами науково-медичних досліджень при цьому є, як весь організм людини, так і його окремі ділянки. На підставі дослідження електричного імпедансу різних ділянок організму людини з’являється можливість об’єктивного оцінювання значення серцевого викиду, кровонаповнення судин, об’ємів та просторів тіла, тощо. Оскільки параметри імпедансу можуть істотно змінюватися під впливом зовнішніх і внутрішніх патофізіологічних, фізіологічних факторів, то це дозволяє використовувати імпедансну спектроскопію для оцінювання стану органів і систем організму при різних захворюваннях та фізіологічних станах [7, 8].

## 5. Методи досліджень

Для вирішення наукових завдань, поставлених у статті, використовувались: аналіз науково-технічної літератури та інформаційних матеріалів із баз мережі Інтернет; теоретичні основи імпедансної спектроскопії; методи цифрової обробки сигналів вимірювань.

## 6. Результати досліджень

Сучасна електронна компонентна база дозволяє створювати мініатюрні прилади й вимірювальні системи для аналізу електричних кіл. Такими є спеціалізовані інтегральні мікросхеми, наприклад, AD5933, AD5940, AD5941, ADUCM355. Основні області застосування таких інтегральних рішень - це імпедансна спектроскопія, біомедичні сенсори, неруйнівний

контроль, аналіз біоелектричного імпедансу, електрохімічний аналіз, аналіз властивостей матеріалів, аналіз електролітів для паливних елементів та акумуляторів [9, 10].

### 6.1. Спеціалізована інтегральна мікросхема AD5933

Функціонально вимірювач імпедансу складається з наступних блоків: генератор гармонійного сигналу, аналізатор напруги та струму двополюсника, блок обробки даних. Таким чином, вимірюючи амплітудне співвідношення струму та напруги, можна розрахувати модуль імпедансу, а знаючи фазову затримку між струмом та напругою, можна обчислити аргумент імпедансу.

Для створення аналізатора з таким функціональним складом можна використовувати інтегральну схему AD5933 від виробника інтегральної електроніки Analog Devices.

Вбудована мікросхема AD5933 є інтегральним перетворювачем спектрального складу імпедансу в широкому діапазоні частот (максимальна частота становить 100 kHz). У цій мікросхемі застосовується метод цифрової обробки сигналів, як для генерації тестової гармонійної напруги, так і аналізу струму двополюсника.

Функціональну блок-схему інтегральної мікросхеми AD5933 приведено на рисунку 1.

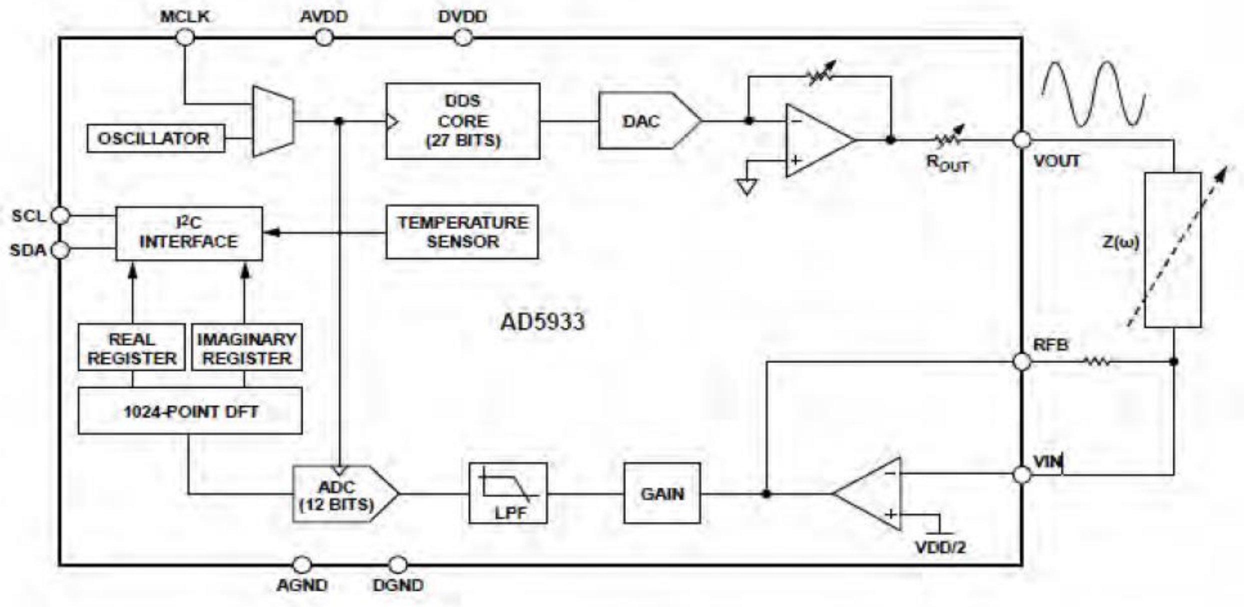



**Рис 1.** Функціональна блок-схема AD5933.

Дана мікросхема поєднує в собі інтегровані генератор частоти та 12-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Генератор частоти дозволяє збуджувати зовнішнє коло із комплексним імпедансом сигналом відомої частоти. Відгук від зовнішнього кола оцифровується інтегрованим АЦП і піддається дискретному перетворенню Фур'є (ДПФ) в інтегрованому модулі цифрової обробки сигналу. Алгоритм ДПФ повертає для кожної частоти вихідного сигналу відліки дійсної (R) та уявної (I) складової. Безпосередньо перед вимірами необхідне калібрування системи [11].

Обчислення здійснюється у зовнішньому пристрої на основі вмісту регістрів дійсної та уявної складових, які можна прочитати через послідовний інтерфейс I2C. В якості результату вимірювань виступають графіки залежності активної (R) та реактивної (I) складових досліджуваного імпедансу, модуль якого обчислюється за формулою (1):

$$|Z| = \sqrt{R^2 + I^2}. \quad (1)$$

Мікросхема AD5933 має всі функціональні блоки, необхідні для побудови вимірювача імпедансу.

Серед основних характеристик мікросхеми можна виділити такі [12]:

- вбудований генератор з максимальною частотою 100 кГц та роздільною здатністю за частотою менше 0,1 Гц;
- наявністю режиму частоти, що коливається;
- діапазон абсолютного значення модуля імпедансу, який вимірюється 1кОм – 1 МОм з можливістю розширення нижньої межі до 100 Ом;
- системна похибка 0,5%;
- наявність інтерфейсу I2C для комунікації з іншими пристроями системи;
- широкий діапазон робочих температур: від -40 ° до +125 ° С;
- мініатюрний корпус SSOP-16 (розміри менше 9×7 мм).

Мікросхема AD5933 має ряд апаратних обмежень: внутрішній генератор має фіксований набір величин розмаху вихідного сигналу (розмах сигналу відповідає подвоєній амплітуді): 2; 1; 0,4; 0,2; вихідний опір генератора залежить від сигналу, що видається: 200 Ом; 2,4 ком; 1,0 кОм та 600 Ом при розмаху вихідного сигналу 2; 1; 0,4; 0,2 відповідно.

Схемотехніка цифрової частини (підключення до мікроконтролера або перетворювача інтерфейсу) є типовою для шини I2C. Тактування цифрової частини мікросхеми може здійснюватися, як зовнішнім генератором прямокутних імпульсів, так і від вбудованого генератора на 16 МГц.

Калібрування мікросхеми AD5933 проводиться при першому вмиканні приладу. В якості тестованого двополюсника вручну підключається резистор заздалегідь відомого номіналу. Для підвищення точності вимірювань рекомендується проводити калібрування з деякою періодичністю для зменшення впливу зміни параметрів навколишнього середовища на результат вимірювання. Для цього необхідно підключити вимірюваний зразок резистор відомого номіналу, та здійснити вимірювання та обчислити модуль імпедансу [13].

Також виробник інтегральної електроніки Analog Devices випускає оціночну плату EVAL-AD5933EBZ, в якій схема мікропроцесорного пристрою здійснює управління мікросхемою AD5933. Ця схема обробляє дані та передає результати роботи на персональний комп’ютер (ПК).

## 6.2. Оціночна плата EVAL-AD5933EBZ

Для вимірювання опорів в діапазоні від 100 Ом до 1 кОм, оціночна плата EVAL-AD5933EBZ має додаткове електричне коло (рис.2) [14].

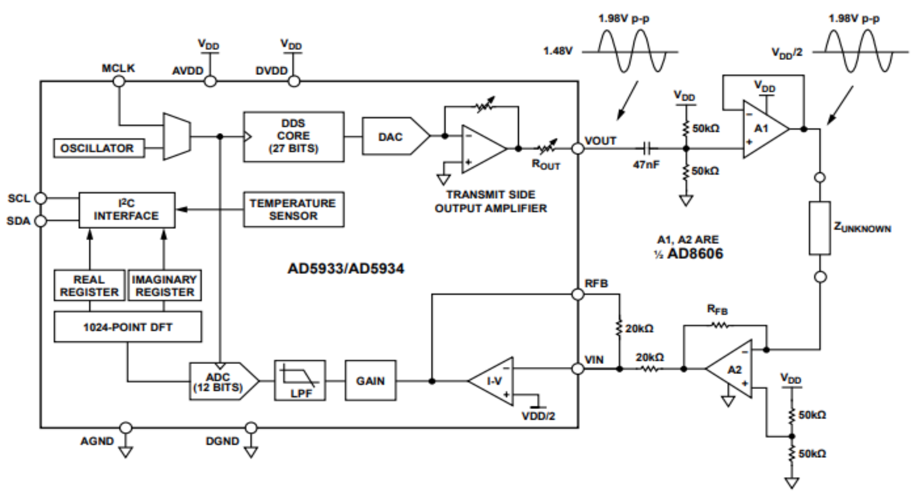



**Рис 2.** Функціональна блок-схема оціночної плати EVAL-AD5933EBZ з додатковим колом.

Плата працює від джерела живлення від 2,7 В до 5,5 В. На оціночній платі EVAL-AD5933EBZ взаємодія з інтегральною мікросхемою AD5933 здійснюється через мікроконтролер CY7C68013-CSP (рис. 3) [14].

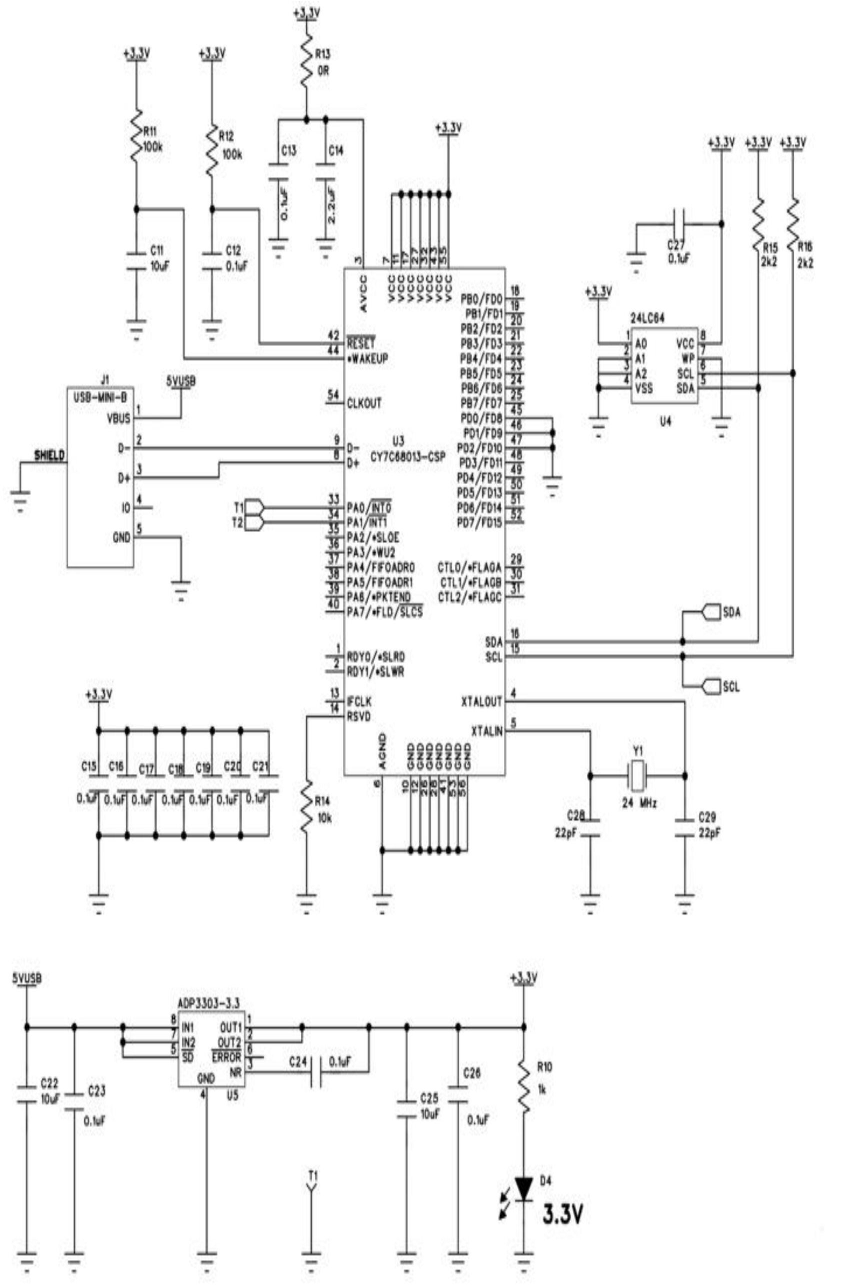



**Рис 3.** Частина принципової електричної схеми оціночної плати EVAL-AD5933EBZ з мікроконтролером CY7C68013-CSP.

На рисунку 4 показана частина електричної принципової схеми оціночної плати з: місцем підключення невідомого опору Z; опором зворотнього зв'язку RFB; інтегральною мікросхемою AD5933; перемикачами режимів роботи плати.

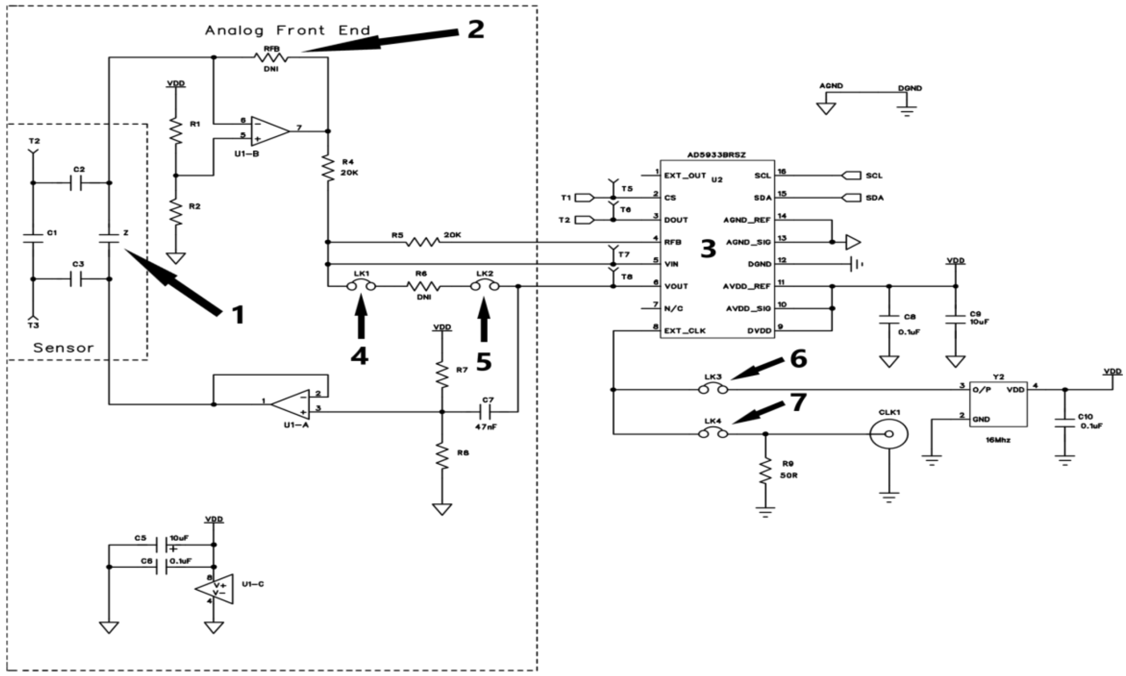



**Рис 4.** Частина електричної принципової схеми оціночної плати з місцем підключення невідомого опору Z (1), опором зворотнього зв’язку RFB (2), мікросхемою AD5933 (3), перемикачами режимів роботи плати LK1, LK2, LK3, LK4 (4 - 7) відповідно.

Оціночна плата містить внутрішній датчик температури з роздільною здатністю 13 біт. Користувач має можливість живити всю схему від USB-порту комп’ютера. На рисунку 5 показана оціночна плата EVAL-AD5933EBZ.

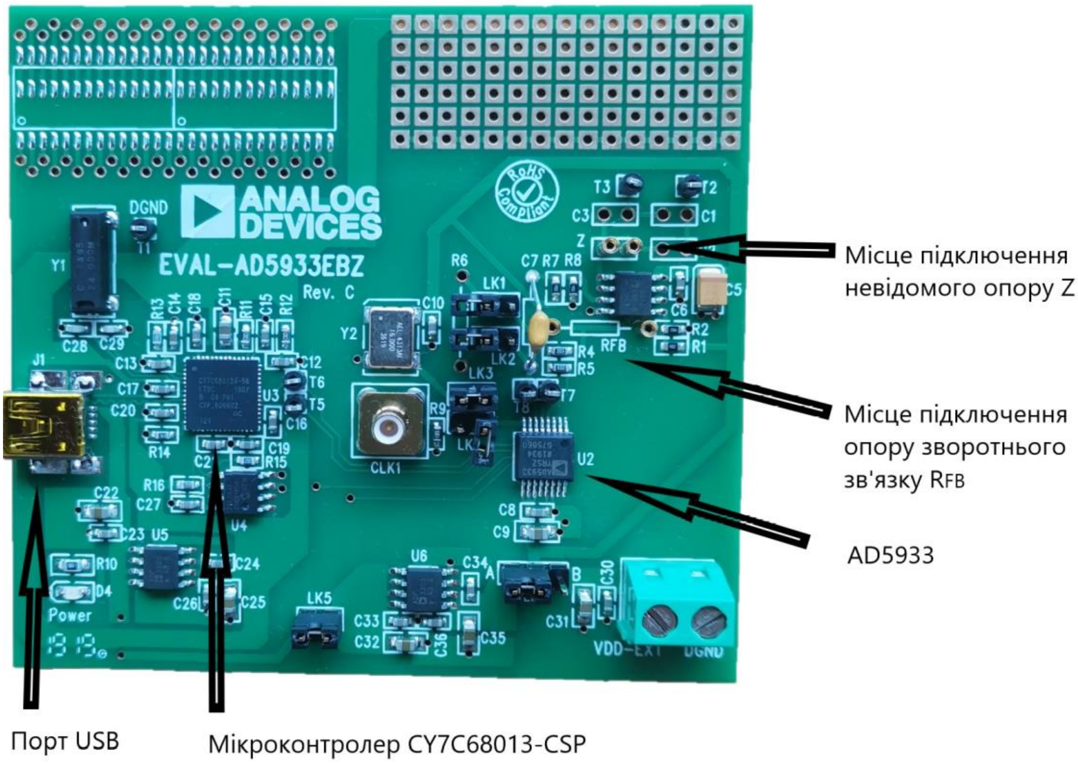



**Рис 5.** Оціночна плата EVAL-AD5933EBZ.

Графічний інтерфейс користувача оціночної плати EVAL-AD5933EBZ розроблено в середовищі Visual Basic (рис. 6).

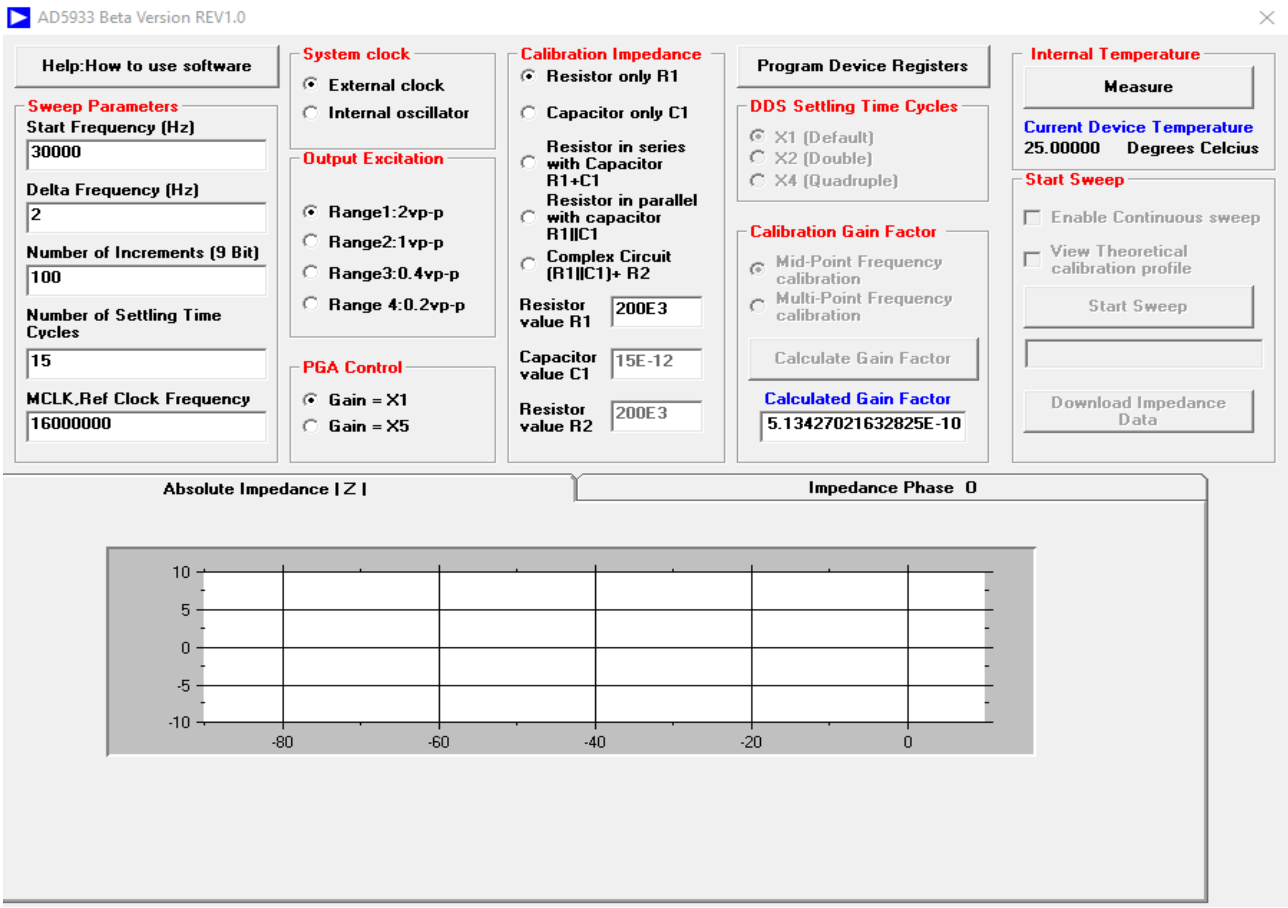



**Рис 6.** Графічний інтерфейс користувача оціночної плати AD-5933EBZ від розробника Analog Device.

Для вимірювання імпедансу за допомогою оціночної плати необхідно виконати чотири кроки:

1. Встановити програмне забезпечення;
2. Провести калібрування оціночної плати;
3. Виміряти невідомий імпеданс;
4. Зберегти дані.

Для виконання вищезазначених кроків, спочатку на комп'ютер необхідно завантажити програмне забезпечення для оціночної плати - AD5933 Software Evaluation (Rev. 1.5) [15]. На оціночній платі замикаються перемички LK3, LK5 (інші роз'єднані). Підключається резистор $R_{cal}$ =100 Ом (калібрувальний опір) в місце підключення Z. Підключається резистор $R_{FB}$ =100 Ом (опір зворотного зв'язку) у місце підключення опору зворотного зв'язку. За допомогою кабелю USB до ПК під'єднується оціночна плата (рис. 7).

В графічному інтерфейсі користувача встановлюються параметри згідно з рисунком 8. На рисунку 8 показана частотна залежність модуля імпедансу |Z|, яка будується в інтерфейсі після натискання на кнопку Start Sweep.

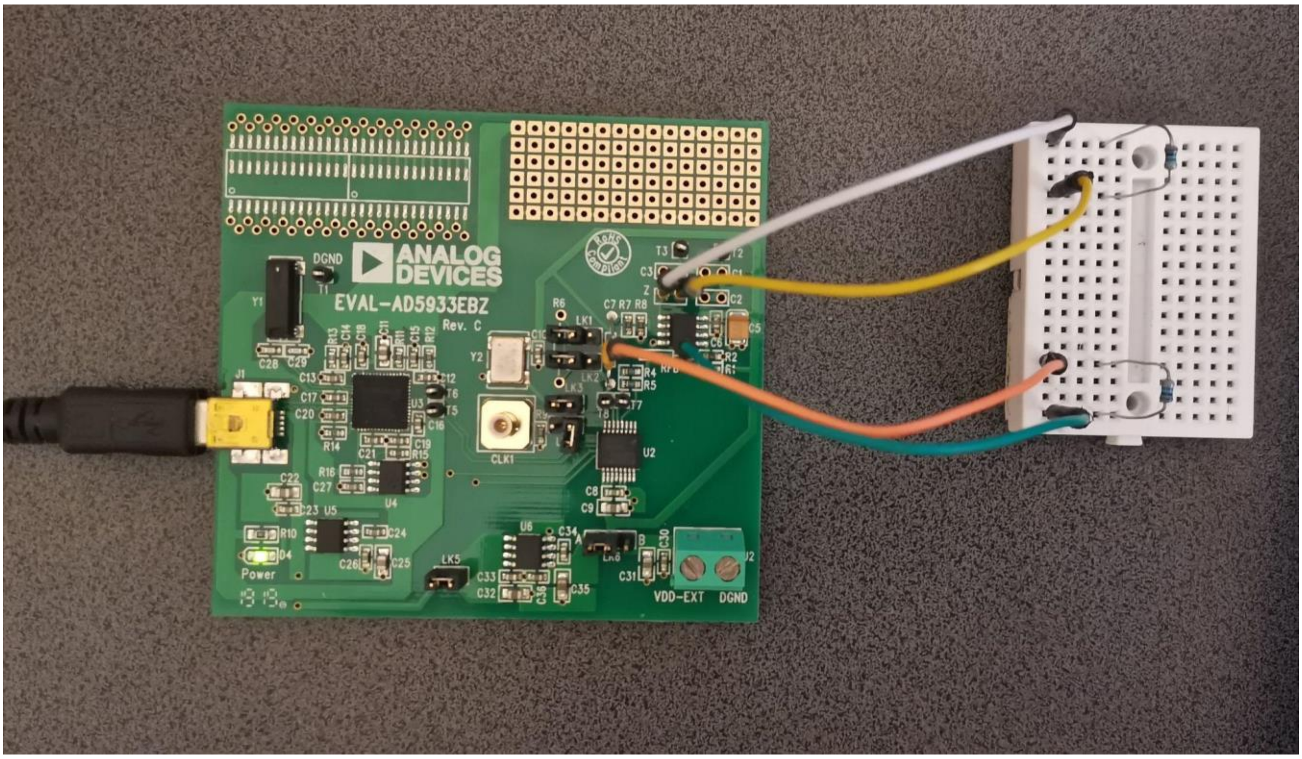



**Рис 7.** Підключення оціночної плати при її калібруванні.

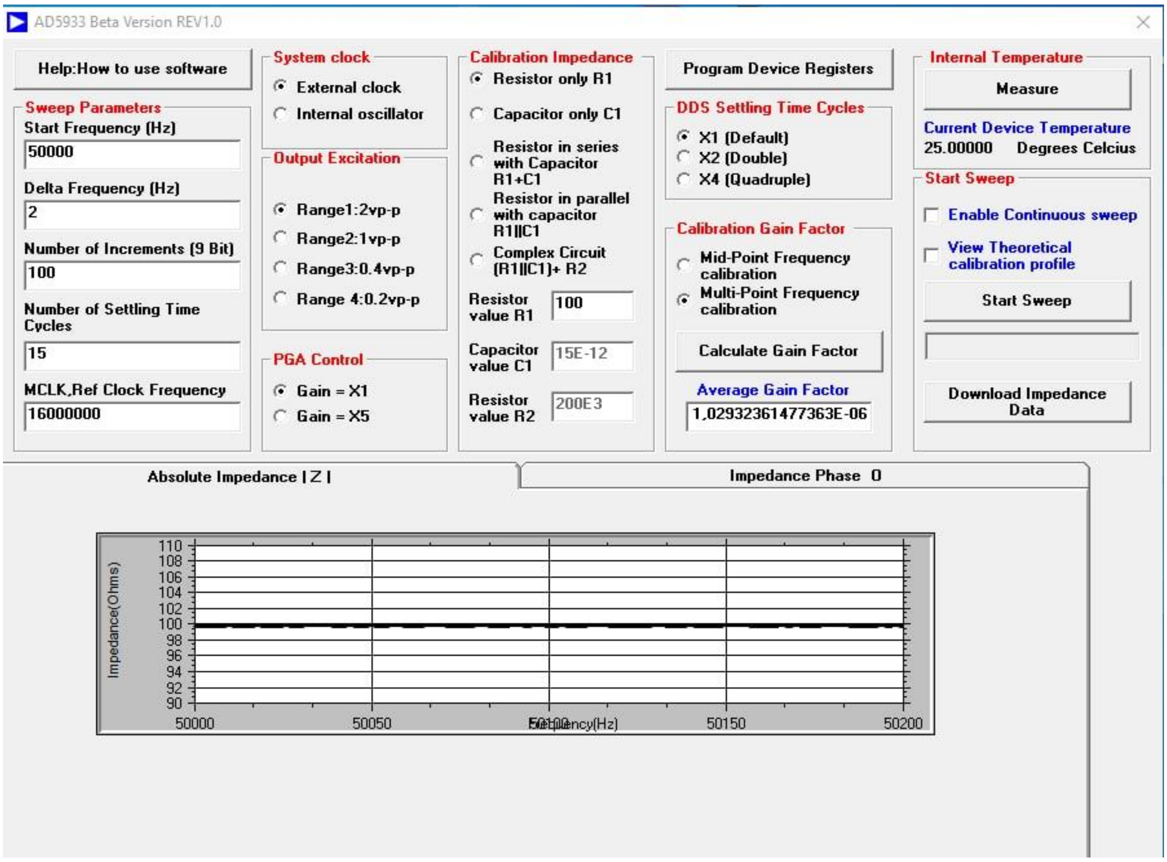



**Рис 8.** Частотна залежність модуля імпедансу при калібруванні оціночної плати ($R_{cal}$ = 100 Ом, $R_{FB}$ = 100 Ом).

На рисунку 9 продемонстровано графік частотної залежності фазового кута імпедансу при калібруванні опорами $R_{cal}$ = 100 Ом, $R_{FB}$ = 100 Ом.

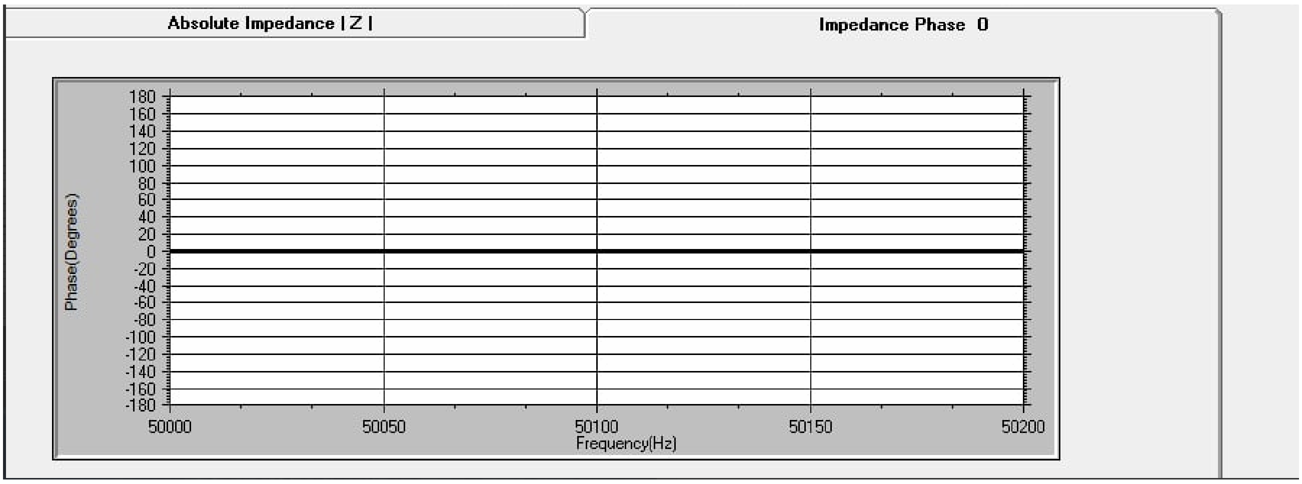



**Рис 9.** Графік частотної залежності фазового кута імпедансу при калібруванні.

### 6.3. Вимірювання невідомого імпедансу та завантаження даних

Для вимірювання невідомого імпедансу необхідно видалити калібрувальний опір Rcal з місця підключення Z. Встановити на його місце невідомий об'єкт, в нашому випадку - помідор (рис. 10).

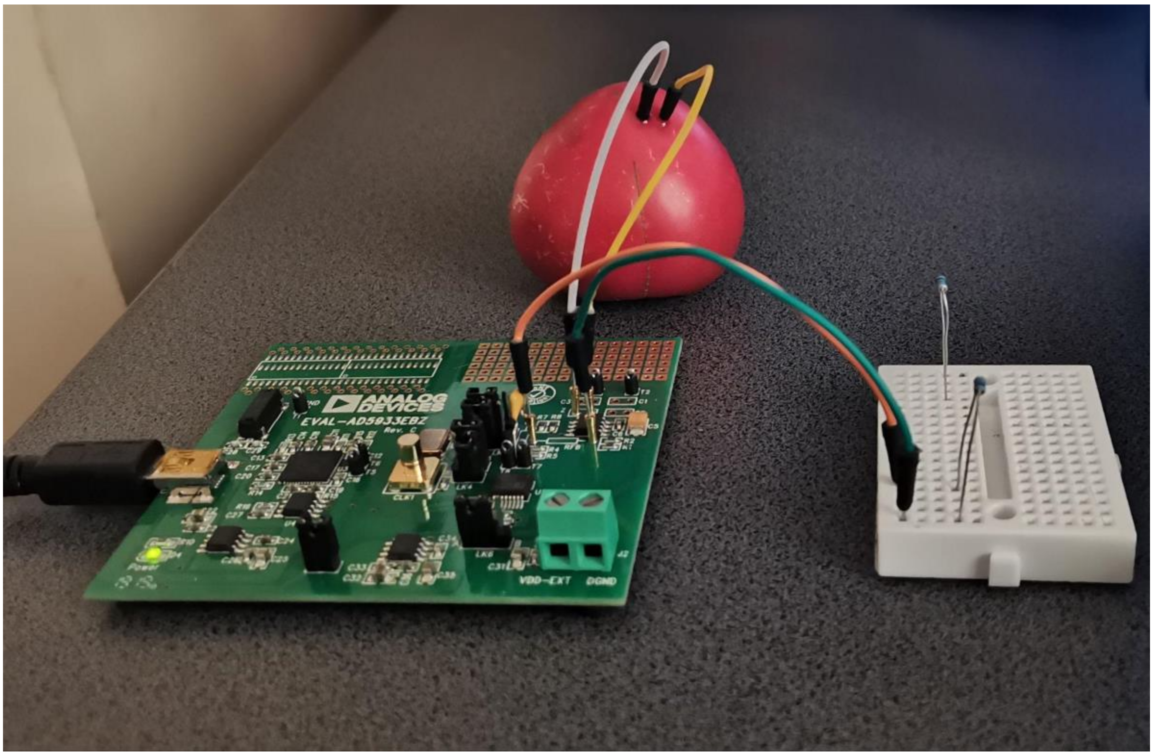



**Рис 10.** Вимірювання невідомого імпедансу.

Параметри в графічному інтерфейсі залишаються без змін, як при калібруванні. На рисунку 11 представлено графік частотної залежності модуля імпедансу помідора.

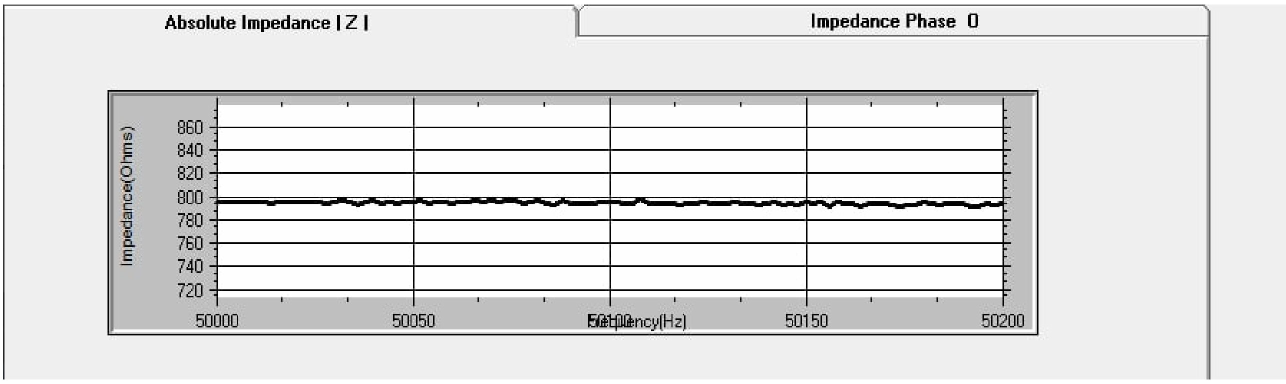



**Рис 11.** Графік частотної залежності модуля імпедансу помідора.

На рисунку 12 показано графік частотної залежності фазового кута помідора.

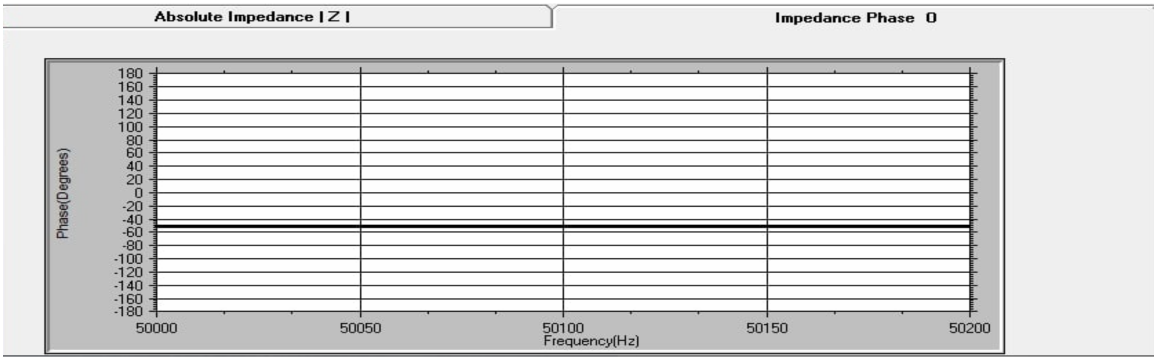
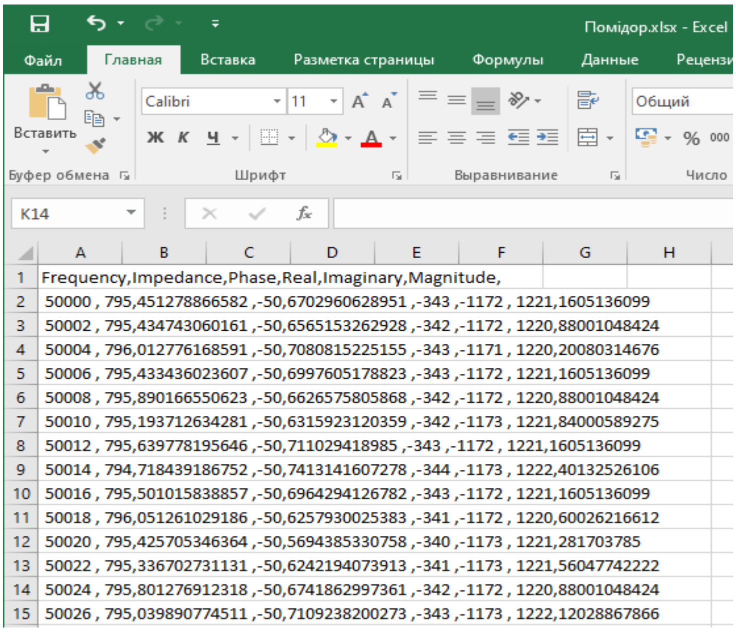



**Рис 12.** Графік частотної залежності фазового кута помідора.

Щоб зберегти дані вимірювань, в графічному інтерфейсі користувача, потрібно натиснути «Download Impedance Data», при цьому дані зберігаються в форматі CSV. Цей формат можна відобразити за допомогою різного програмного забезпечення, наприклад Excel, Matlab, MathCad, та інші. В нашому випадку використовуємо програму Excel (рис. 13).



| | A |
|---|---|
| 1 | Frequency,Impedance,Phase,Real,Imaginary,Magnitude, |
| 2 | 50000 , 795,451278866582 ,-50,6702960628951 ,-343 ,-1172 , 1221,1605136099 |
| 3 | 50002 , 795,434743060161 ,-50,6565153262928 ,-342 ,-1172 , 1220,88001048424 |
| 4 | 50004 , 796,012776168591 ,-50,7080815225155 ,-343 ,-1171 , 1220,20080314676 |
| 5 | 50006 , 795,433436023607 ,-50,6997605178823 ,-343 ,-1172 , 1221,1605136099 |
| 6 | 50008 , 795,890166550623 ,-50,6626575805868 ,-342 ,-1172 , 1220,88001048424 |
| 7 | 50010 , 795,193712634281 ,-50,6315923120359 ,-342 ,-1173 , 1221,84000589275 |
| 8 | 50012 , 795,639778195646 ,-50,711029418985 ,-343 ,-1172 , 1221,1605136099 |
| 9 | 50014 , 794,718439186752 ,-50,7413141607278 ,-344 ,-1173 , 1222,40132526106 |
| 10 | 50016 , 795,501015838857 ,-50,6964294126782 ,-343 ,-1172 , 1221,1605136099 |
| 11 | 50018 , 796,051261029186 ,-50,6257930025383 ,-341 ,-1172 , 1220,60026216612 |
| 12 | 50020 , 795,425705346364 ,-50,5694385330758 ,-340 ,-1173 , 1221,281703785 |
| 13 | 50022 , 795,336702731131 ,-50,6242194073913 ,-341 ,-1173 , 1221,56047742222 |
| 14 | 50024 , 795,801276912318 ,-50,6741862997361 ,-342 ,-1172 , 1220,88001048424 |
| 15 | 50026 , 795,039890774511 ,-50,7109238200273 ,-343 ,-1173 , 1222,12028867866 |

**Рис 13.** Збережені дані вимірювань в програмі  Excel .

## 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У наступних публікаціях будуть розглянуті експериментальні дослідження оціночної плати EVAL-AD5933EBZ на зразках біологічних тканин при впливі на них різних зовнішніх фізичних факторів (температура, тиск та інші.).

## 8. Висновки

В статті розглянута інтегральна мікросхема AD5933, її функціональна блок-схема, основні характеристики. Ця мікросхема є базою оціночної плати EVAL-AD5933EBZ, яка дозволяє впроваджувати методи імпедансної спектроскопії у медицину, промисловість та сільське господарство для систем збору і обробки даних, розширюючи можливості інтерпретації одержаної інформації.

---

**Список посилань:**

1) Vermesan, O., Friess, P. (2013). Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems, River Publishers, 363.

2) Григорчак, І., Понеділок, Г. (2011). Імпедансна спектроскопія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 352.

3) Ямпилов, С., Галсанов, Б., Копылова, Е., Батоцыренов, Т. (2016). Разработка аппарата для проведения электроимпедансной спектрометрии. Автоматика и программная инженерия, №4 (18), 57-59.

4) Барило, Г., Голяка, Р., Прудиус, І., Фабіровський, С. (2018). Вимірювальні перетворювачі імпедансу з чотиритактним детектуванням сигналу. Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, Iss. 62-28.

5) Gajasinghe, R., Tigli, O., Jones, M., Ince, T. (2016). Label-free tumor cell detection and differentiation based on electrical impedance spectroscopy. 2016 IEEE SENSORS. doi: 10.1109/icsens.2016.7808466.

6) Hong, B., Sun, A., Pang, L., Venkatesh, A., Hall, D., Fainman, Y. (2016). Integrated biosensor for simultaneous detection by surface plasmon resonance and Faradaic electrochemical impedance spectroscopy. Conference on Lasers and Electro-Optics, 113. doi: 10.1364/cleo_at.2016.jw2a.

7) Антонюк, О. О. (2016). Вдосконалення методів та засобів імпедансометрії для дослідження тканин організму людини. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 20.

8) Дубко, А.Г., Тертична, В.С., Нікітін, В.О. (2022). Діагностика стану тканин організму на основі біоімпедансного аналізу. Theoretical and science bases of actual tasks. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. Lisbon, Portugal, 253-259.

9) Антоненко Є. О. (2021).Система імпедансної спектроскопії біологічних рідин і суспензій. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем (фізикоматематичні науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. Харків, 171.

10) Феклистов, А., Волобуев, С., Петрухин, В., Юдаев, И. (2021). Проектирование устройства для экспресс-контроля состояния посевов после зимовки. Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование № 2 (54), 64-71.

11) Акулов, С., Исаев, И., Иралиева, М. (2015). Исследование принципа работы прецизионного преобразователя на микросхеме AD5933. Международный научный журнал «Инновационная наука» №5, 9-12.

12) 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer AD5933. Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf.

13) Базаев, Н., Пржиялговская А., Руденко П. (2016). Особенности использования микросхемы AD5933 в качестве измерителя импеданса при проектировании малогабаритных систем. Известия вузов. Электроника. Том 21 № 3. 279-285.

14) Evaluation Board User Guide. Available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-364.pdf.

15) EVAL-AD5933. Available at: https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad5933.html#eb-documentation.

## Measurement of the impedance of biological tissues and other environments using the evaluation board EVAL AD5933EBZ

**Viktor Nikitin**

Department of Biomedical Cybernetics National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine

**Anrii Dubko**

Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology E.O. Paton Electric Welding Institute; Department of Biomedical Engineering National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine

**Abstract:** Analysis and measurement of electrophysical properties of biological materials, liquids and suspensions is an important applied task for almost all fields of medicine, chemistry, pharmacy, physics and other fields that require research into the properties and structure of matter. The modern electronic component base allows you to create miniature devices and measuring systems for the analysis of electric circuits, such is the specialized integrated microcircuit AD5933. This microcircuit is an integral converter of the spectral composition of the impedance in a wide frequency range. The AD5933 microcircuit uses a method of digital signal processing both to generate the test harmonic voltage and to analyze the bipolar current. It is the basis of the evaluation board EVAL-AD5933EBZ, which allows to implement methods of impedance spectroscopy in medicine, industry and agriculture.

**Keywords:** impedance spectroscopy, integrated microcircuit AD5933, evaluation board EVAL-AD5933EBZ, frequency range, microcontroller, software, graphical user interface, calibration, biological tissues.